

임의 간격 타이닝 설계를 통한 콘크리트 포장의 소음 저감 연구

Noise Reduction of Concrete Pavement Through Design of Random Transverse Tine Spacing

조윤호* · 박진희** · 이재음***

Cho, Yoon Ho · Park, Jin Whoy · Lee, Jae Eung

1. 서론

콘크리트 포장은 강도 및 내구성 등 구조적인 측면에서 우수하지만 아스팔트 포장에 비해 타이어와 포장면에서 발생하는 소음이 크기 때문에 주민들의 민원을 야기시킬 수 있으며 운전자의 피로감을 높일 수 있다.

일반적으로 도로에서 발생하는 소음은 자동차 엔진 소음과 도로의 포장면과 타이어 사이에서 발생하는 소음으로 구분된다. 표면처리 방법에 따른 소음에 대한 연구는 이미 외국에서 30여년 전부터 진행해오고 있으며 포장/타이어의 소음을 줄이기 위한 다양한 표면처리 공법을 개발하여 도로 포장에 적용하고 있다. 그러나 국내에서 표면처리 방법에 따른 소음 감소에 대한 연구는 미비한 실정이다.

콘크리트 포장에서 발생하는 소음 중에서 도로 주변 및 운전자에게 큰 영향을 미치는 것이 일정한 간격으로 시공되고 있는 횡방향 타이닝에서 비롯되는 Whine현상이다.(Billera, 1997) 본 연구에서는 LCG 이론을 적용하여 소음 저감에 효과적인 랜덤 타이닝 설계 간격을 제시하였고 연구 결과를 바탕으로 시험 시공을 실시하였다.

2. 소음 발생 메커니즘 및 소음 저감 원리

차량이 도로 주행시 발생하는 소음은 크게 엔진음과 같은 기계적인 소음과 타이어와 포장면 사이에서 발생하는 소음으로 구분된다. 주행 소음은 차량 속도가 증가할수록 기계적인 소음보다는 타이어/포장 소음이 전체 소음에 있어서 점차 큰 비중을 차지하게 된다. 그림 1은 속도에 따른 기계적 소음과 타이어/포장 사이의 소음 발생 관계를 나타내고 있다.(Sandberg, 2002)

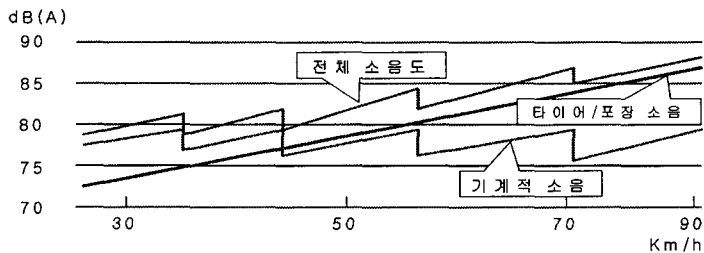


그림 1. 속도에 따른 기계적 소음과 타이어/포장 소음 관계(Sandberg, 2002)

* 정희원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 02-820-5336(E-mail : yhcho@cau.ac.kr)

** 비희원, 중앙대학교 건설환경공학과 석사과정 02-816-0251(E-mail : kapac@hanmail.net)

*** 비희원, 중앙대학교 기계공학부 교수 02-820-5283(E-mail : jell@cau.ac.kr)



타이어 소음은 200Hz~3kHz에 걸쳐 분포되어 있어 인간에게 민감하게 작용한다. 타이어/포장 소음은 크게 타이어 진동에 의한 소음, 공기 역학적인 소음, 타이어와 표면과의 충격에 의한 소음으로 구분되며 대부분의 소음은 타이어와 표면과의 충격에 의해 발생된다.(김병삼·홍동표, 1994) 이것은 타이어의 원주방향으로 배열된 타이어의 패턴홈들이 표면과 충돌하며 발생하는 반복적인 충격음으로 피치 소음(pitch noise)이라고도 한다. 피치 소음은 타이어의 재료물성, 패턴의 모양, 노면 형상(profile) 등에 의해 영향을 받는다. 여러 소음원 중에서 차량의속도가 증가할수록 트레드 패턴(Pattern Vibration Noise)에 의한 피치 소음의 비율이 지배적인 것으로 나타났다.(김병삼·홍동표, 1994)

현재 콘크리트 포장에는 일정한 간격의 횡방향 타이닝이 시공되고 있다. 피치 소음의 경우 반복적인 충격으로 인해 발생하는 것으로 트레드 패턴과 도로 표면과의 충격이 주기적으로 발생하게 되면 일정한 주기를 형성하면서 사람에게 불쾌감을 유발시키는 순음(pure tone)을 발생시킨다. 따라서 소음을 감소시키기 위해서는 포장 표면의 타이닝을 불규칙하게 배열함으로써 특정 주파수의 소음이 크게 발생하는 것을 억제해야한다. 즉, 충격음으로부터 형성되는 피크(peak)를 여러 개로 분산시켜서 피치 소음으로 인한 소음을 줄일 수 있는 표면 조직의 최적 설계가 요구된다.

3. 타이닝 패턴 시뮬레이션 모형

기존 포장의 노면 패턴에 관한 연구를 살펴보면 콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화에 따른 소음도 결과에 대한 내용은 있었지만 랜덤화 방법에 대한 연구는 거의 없었다. 그러나 소음 저감을 위한 타이어 트레드 패턴 배열에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존 타이어 트레드 패턴 연구 결과를 바탕으로 콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화를 시도하였다.

타이닝의 최대 및 최소 간격, 간격 종류를 정하는 과정에는 몇 가지 고려할 사항이 있다. 우선 실제 시공에 사용하는 빗살의 길이가 2m 정도로 비교적 짧다. 또한 타이닝 홈의 폭이 3mm 이므로 실제 타이닝 간격을 일정값 이하로 작게 할 수 없으며, 시공성을 고려하면 간격을 소숫점 단위로 정확하게 설계할 수 없다. 또한 안전성을 고려할 때 타이닝 간격을 일정 값 이상으로 크게 할 수 없는 한계도 있다.

따라서 여러 경우의 타이닝 최대 간격과 최소 간격, 간격의 종류, 간격 종류별 개수를 선정된 후 타이닝 배열을 랜덤화하여 그 스펙트럼을 평가하였다. 또한 기존 등간격 타이닝 노면의 마찰력 수준을 유지하기 위하여 단위면적당 거칠기를 기존의 경우와 같게 하였다. 타이닝의 랜덤 변수를 도출하기 위한 방법으로 LCG(linear congruential generators) 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 [0,1) 사이의 연속된 수 {U_i}를 생성하는 알고리즘으로써 다음과 같은 식으로 표현된다.(Bowman, 1995)

$$\begin{aligned}
 X_i &= (aX_{i-1} + c) \bmod M \\
 U_i &= X_i / M \\
 0 &\leq a, c, X_0 \leq M - 1
 \end{aligned}
 \tag{식 1.}$$

여기서 a : multiplier
 c : increment
 M : modulus
 X₀ : seed

$a \bmod b$ 의 의미는 a 를 b 로 나누었을 때의 나머지를 나타내며, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a = bk + (a \bmod b) \quad a, b, k \text{ 는 정수} \tag{식 2.}$$



c 가 '0'일 경우를 "Multiplicative congruential generator"라 하고 $\{U_i\}$ 는 (0,1]의 값을 가지게 되며, $c \neq 0$ 인 경우를 "Mixed congruential generator"라 하고 $\{U_i\}$ 는 [0,1)의 값을 가지게 된다. 또한 나머지의 값수는 M 개가 되므로 $M+1$ 번째의 수는 처음 수와 동일하게 되는데 이것 때문에 주기성을 가진다.(Gentle, 2003)

이러한 이론을 바탕으로 먼저 (0, 1)의 값을 갖는 유니폼 랜덤 배열을 생성한 후 타이닝 간격의 종류와 동일한 수로 균등하게 구간을 나누어 각 구간의 범위 내에 있는 값들은 특정한 타이닝 간격 값을 갖게 하였다. 즉 20mm, 30mm, 40mm의 타이닝 간격을 랜덤 배열할 경우 (0, 1]의 값을 갖는 랜덤 배열을 생성 후, 배열의 값이 $0 < \text{배열의 값} \leq 1/3$ 이면 20mm를, $1/3 < \text{배열의 값} \leq 2/3$ 이면 30mm를, $2/3 < \text{배열의 값} \leq 1$ 이면 40mm를 배정하였다.

생성한 노면을 평가하기 위하여, 피크비(peak ratio), crest factor, 그리고 분산(variance) 값을 계산하였다. 피크비는 위의 등간격 노면 스펙트럼의 최대값과 랜덤 타이닝 간격 모델의 스펙트럼 최대값의 비를 의미하는 것으로 특정 주파수에 집중된 에너지가 얼마나 낮아졌는지를 평가할 수 있어 타이닝 간격의 랜덤화 정도를 파악할 수 있고, crest factor는 스펙트럼의 평균값과 최대값의 비를 나타낸 것으로 이 값과 분산으로부터 스펙트럼의 평탄성을 판단할 수 있다. crest factor를 비교하는 이유는 평균값과 피크값의 차이가 많이 날수록 구에 거슬리는 소음이 발생하기 쉽기 때문이다.

타이닝 패턴 변화에 대한 입력신호의 스펙트럼 변화를 살펴보기 위해 다음과 같은 기준으로 다양한 경우의 타이닝 간격 랜덤화 모델을 선정하였다.

1. 간격 종류의 각각의 개수가 등(uniform) 분포
 - ① 최대간격과 최소간격을 변화시킨 모델(모델번호 1~7)
 - ② 간격 종류를 변화시킨 모델(모델번호 8~15)
2. 간격 종류의 각각의 개수가 정규(normal) 분포
 - ① 정규 분포(모델번호 16~27)
 - ② 역정규 분포(모델번호 28~39)
3. 모델번호 10과 11의 정규(normal) 분포
 - ① 정규 분포(모델번호 40~43)
 - ② 역정규 분포(모델번호 44~47)

다양한 노면 모델을 선정하여 비교한 결과 표 1에 제시된 5가지 조건이 타 모델에 비해 crest factor, 분산, 피크비 값이 작게 나타났으며 스펙트럼 또한 비교적 평탄함을 알 수 있었다. 그림 2~그림 6에서는 5가지 모델에 대한 스펙트럼 분석 결과를 보이고 있다.

표 1. 선정 모델별 조건 비교

모델 No.	최대 간격과 최소 간격	간격 종류 및 구성비	2m당 타이닝 개수	crest factor	분산	피크비
10	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (uniform)	62	1.5732	0.0007	0.1502
40	10~50	10_20_30_40_50 (1:2:2:2:1)	62	1.5431	0.0008	0.1474
43	10~50	10_20_30_40_50 (3:2:1:2:3)	63	1.5870	0.0006	0.1471
45	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (1:2:2:3:3:3:2:2:1)	63	1.4819	0.0010	0.1442
47	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (3:2:2:1:1:1:2:2:3)	63	1.5703	0.0007	0.1512

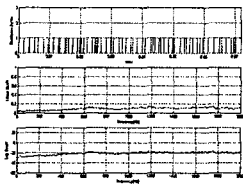


그림 2. 모델 10의 입력 스펙트럼

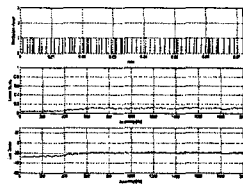


그림 3. 모델 40의 입력 스펙트럼

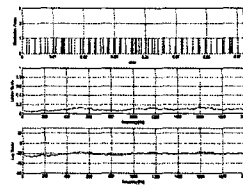


그림 4. 모델 43의 입력 스펙트럼

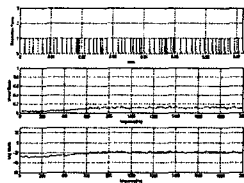


그림 5. 모델 45의 입력 스펙트럼

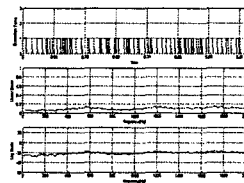


그림 6. 모델 47의 입력 스펙트럼

위 결과로부터 선정된 5가지 노면 모델의 신뢰도를 평가하기 위해 각각의 경우에 대하여 1000개의 랜덤화 노면 프로파일을 생성하여 분석하였다. 먼저 각 노면 프로파일의 스펙트럼에 대한 평균을 구했으며 또한 각 주파수에서의 표준편차를 구하여 평균 스펙트럼 참값(true mean spectrum value)의 신뢰성 구간을 산정하는데 사용하였다. 평균값의 표준편차를 데이터수가 유한한(N) 단일 데이터로부터 구하는 경우 그 값은 다음과 같이 구할 수 있으며 student-t 분포(distribution)를 갖는다.

$$S_x = \frac{S_x}{N^{1/2}} : \text{평균의 표준편차} \quad \text{식 3}$$

여기서 S_x 는 단일 데이터 세트의 표준 편차이다. 따라서 평균값의 참값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x' = \bar{x} \pm t_{v,P} S_x \quad (P\%) \quad \text{식 4}$$

여기서 t -estimator $t_{v,P}$ 는 자유도($v = N - 1$)와 확률(probability) P 의 함수이다. 그러나 이 경우처럼 데이터수가 많은 경우에는 student-t distribution은 정규 분포(normal distribution)를 갖게 된다.(Figliola, 2000) 피크가 발생하는 주파수와 그 지점에서 피크값을 표 2에 나타냈다.

표 2. 스펙트럼 피크값의 95% 신뢰성 범위

노면모델	피크값의 주파수	1000개 평균 피크값±신뢰성 구간
10	1724Hz	0.1283 ± 0.0021
40	1212Hz	0.1210 ± 0.0020
43	515Hz	0.1248 ± 0.0020
45	1751Hz	0.1265 ± 0.0020
47	1728Hz	0.1311 ± 0.0022



먼저 스펙트럼의 크기를 비교하기 위하여 30mm 등간격 일때 840Hz에서 발생한 스펙트럼 피크 값과 비교해보면 모든 경우에 그 크기가 약 87~88% 감소한 것을 볼 수 있으며(피크비 0.12~0.13) 이를 환산하면 약 18dB가 감소한 것을 볼 수 있다. 물론 이것은 소음도가 18dB 감소한다는 의미가 아니며 특정 주파수에 집중되어 있던 타이어를 가진하는 입력신호의 최대 크기가 18dB 감소했다는 의미이다. Case 7-3-1이 가장 낮은 피크비와 평탄한 스펙트럼을 나타내어 가장 좋은 노면 모델이라 볼 수 있다. 그러나 Case 7-3-4와 Case 7-4-2도 신뢰성 구간을 고려해볼 때 비교적 우수한 노면 모델이라고 판단된다.

4. 시험 시공

실내 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 현재 시공 중인 대구-포항간 고속국도 제 1공구에 시험 시공을 실시하였다. 앞서 제시했던 5가지 간격 배열 중에서 비교적 우수한 스펙트럼 분포를 보인 1번과 4번을 이용하여 3가지 설계 표면을 현장에 적용하였다. 그 밖에 비교를 목적으로 시험 도로에 시공되었던 랜덤 타이닝 구간을 재현하였고, 국외 문헌을 참고로 하여 현재 뉴욕주 시방에 제시되어 있는 설계 간격을 적용하였다.(Wisconsin, 2000) 표 3은 본 시험 시공에 적용된 타이닝 간격 배열을 나타내고 있으며 그림 7에서는 구간별 현황을 보이고 있다. 시험 시공이 이루어진 장소는 현재 시공 중인 구간이기 때문에 향후 구간별 소음 측정 실험을 실시하여 실내 시뮬레이션 결과와 비교할 예정이다.

표 3. 각 구간별 설계 타이닝 간격

구 분	타이닝 간격																							
1번 설계구간	40	30	15	35	10	35	30	40	20	20	30	45	45	45	35	15	20	15	25	40	15	40	40	
	50	30	45	25	35	25	25	40	50	10	45	35	30	35	30	30	35	25	40	25	30	10	25	
	30	30	15	10	15	20	30	30	30	25	50	45	45	35	15	40								
2번 설계구간	20	20	35	15	10	15	30	45	15	25	15	40	20	45	15	20	40	25	45	45	40	30	45	35
	15	50	30	50	20	10	45	20	30	35	40	35	45	45	30	40	50	50	40	15	45	25	25	15
	10	20	30	50	40	20	35	30	20	10	10	50	40	35										
3번 설계구간	25	40	25	30	35	35	40	35	35	30	50	40	50	10	45	10	15	50	45	20	30	25	40	15
	40	10	20	30	30	20	10	35	10	25	40	30	35	30	20	10	30	40	40	15	25	15	10	50
	40	35	10	30	20	10	15	35	15	20	50	45	20	15	15	40	15	20	45					
시험 도로 재현	15	30	40	30	15	20	30	15	40	30	15	20	40	15	40	20	30	40	15					
국외 문헌 재현	16	25	22	16	32	19	25	25	25	25	19	22	25	22	10	25	25	25						
	32	38	22	25	22	25																		

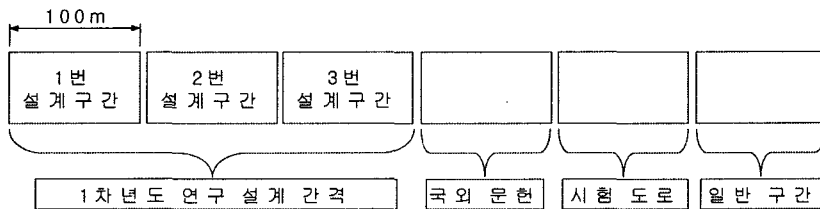


그림 7. 시험 시공 구간별 설계 표면 현황

5. 결 론

본 연구에서는 소음 발생의 기본 메커니즘을 바탕으로 소음 저감을 위한 타이닝 패턴 랜덤화 설계를 실시하였다. 이를 위해 LCG 알고리즘의 이론을 적용하여 랜덤 타이닝 설계 방법을 제안하였으며, 생성된 노면 프로파일에 대한 스펙트럼을 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 단위 면적당 거칠기를 기존 노면과 같게 하여 기존의 일정 간격 타이닝을 가진 노면과 동일한 마찰저항을 갖게 하였다. 본 연구에 대한 결과는 다음과 같다.



1. 주행 중인 자동차에서 발생하는 소음은 속도가 증가할수록 타이어/포장 소음의 비중이 지배적이며, 특히 타이어와 노면과의 충돌에서 발생하는 피치소음이 전체 소음에 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다. 피치 소음의 경우 반복적인 충격으로 인해 발생하는 것으로, 반복적인 충격음으로부터 형성되는 피크(peak)를 여러 개로 분산시킴으로써 소음을 저감시킬 수 있다고 판단된다.
2. 현장 시공성을 고려하여 타이닝 빗살의 길이는 2m로 가정하였고 기존 포장이 가진 단위 면적당 표면 거칠기를 고려하여 동일한 마찰저항을 갖게 하였다. LCG 알고리즘을 적용한 결과 랜덤 타이닝이 등간격 타이닝에 비해 평탄한 스펙트럼을 나타냈다. 이는 특정한 주파수에 집중되는 입력신호의 최대 크기가 감소했음을 의미한다.
3. 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 또한 타이닝 간격의 종류가 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 더 우수하게 나타났다. 따라서 노면 프로파일의 스펙트럼은 타이닝 간격의 종류와 구성비에 영향을 받는 것으로 나타났다.
4. 최적의 타이닝 간격 설계는 본 연구에서 제안한 평가지표(피크비, crest factor, 분산)를 다양한 시뮬레이션 결과에 적용하여 5가지 경우를 선정하였다. 정밀 분석한 결과 5가지 모두 등간격 타이닝 경우와 비교하였을 때보다 스펙트럼 피크값이 감소하는 것으로 나타났다.
5. 실내 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 현재 시공 중인 고속국도에 설계 표면을 적용하였고 향후 소음 측정 실험을 실시할 예정이다.

6. 참고 문헌

1. Dominick Billera, Bela Schmidt, Wayne Miller, **Stop the Whine! Narrow Band Level Measurements of Three Highway Pavements**, January. 1997
2. 김병삼, 홍동표, **타이어와 소음**, 한국소음진동공학회지 제4권 제4호, 1994
3. Ulf Sandberg, Jerzy A. Ejsmont, **Texturing of Cement Concrete Pavement to Reduce traffic Noise Emission**, TRB, 1998
4. K. Hieronimus, G. Hellener, **Reduction of car sound emission by means of systematic development work**, Unikeller conference 91, 1991
5. John H. Varterasian, **Quieting Noise Mathematically-Its Application to Snow Tire**, Research Labs., General Motors Corp.
6. Richard L. Bowman, **Evaluating Pseudo-Random Number Generators**, Computer & Graphics, vol.19 no.2, pp.315-324, 1995
7. James E. Gentle, **Random Number Generation and Monte Carlo Method**, springer, 2003
8. Ziad S. Saad, John R. Jaeckel, Yosef Z. Becker, David Kuemmel, Alex Satanovsky and Kristina Ropella, **Design of a Randomized Tining Rake for Portland Cement Concrete Pavements Using Spectral Analysis**, Transportation Research Record 1702, Paper No. 00-1136, pp.63-68, 2000
9. Richard S. Figliola and Donald E. Beasley, **Theory and Design for Mechanical Measurements**, John Wiley & Sons, 2000
10. Roger L. Wayson, **Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise**, NCHRP Synthesis 268, 1998
11. Wisconsin Department of Transportation, **Noise and Texture on PCC Pavements**, June, 2000